

УДК 681.2.08:53.088; УДК 620.179.14

*І. В. ГРИГОРЕНКО, С. М. ГРИГОРЕНКО, Л. О. ВОВК***ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ  
ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ FUZZY-LOGIC**

В роботі розглянуто вирішення науково-практичної задачі контролю точності вимірювання параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі для підвищення її якості за допомогою створення евристичного аналізатору на базі інтерфейсу користувача системи Fuzzy-Logic.

Проаналізовано фактори, що впливають на точність вимірювання, доведено можливість застосування апарату Fuzzy-Logic для визначення таких параметрів технологічного процесу, які забезпечують максимальну якість продукції. Проведено комп'ютерне моделювання, яке підтвердило, що створення евристичного аналізатору для визначення якості карамелі доцільно та необхідно для того, щоб не допустити виробництво неякісної продукції. На підставі даних, отриманих з результатів натурних вимірювань параметрів технологічного процесу виготовлення карамельного сиропу проведено розрахунки стандартної невизначеності результатів вимірювань по типам А та В, щоб мати можливість своєчасно прогнозувати відмову датчиків на основі зміни форми закону розподілу результатів вимірювань та назначити міжповітряні інтервали для досліджуваного обладнання.

**Ключові слова:** вимірювач, похибка, нечітка логіка, евристичний аналізатор, точність, контроль.

*І. В. ГРИГОРЕНКО, С. Н. ГРИГОРЕНКО, Л. А. ВОВК***ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ FUZZY-LOGIC**

В работе рассмотрено решение научно-практической задачи контроля точности измерения параметров технологического процесса изготовления карамели для повышения ее качества с помощью создания эвристического анализатора на базе интерфейса системы Fuzzy-Logic.

Проанализированы факторы, влияющие на точность измерения, доказана возможность применения аппарата Fuzzy-Logic для определения таких параметров технологического процесса, которые обеспечивают максимальное качество продукции. Проведено компьютерное моделирование, которое подтвердило, что создание эвристического анализатора для определения качества карамели целесообразно и необходимо для того, чтобы не допустить производство некачественной продукции. На основании данных, полученных по результатам натурных измерений параметров технологического процесса изготовления карамельного сиропа проведены расчеты стандартной неопределенности результатов измерений по типам А и В, чтобы иметь возможность своевременно прогнозировать отказ датчиков на основе изменения формы закона распределения результатов измерений и определять межповерочный интервал для исследуемого оборудования.

**Ключевые слова:** измеритель, погрешность, нечеткая логика, эвристический анализатор, точность, контроль.

*I. V. HRIHORENKO, S. N. HRIHORENKO, L.O. VOVK***RESEARCH OF MONITORING AND MEASURING EQUIPMENT  
USING THE FUZZY-LOGIC SYSTEM**

The paper considers the solution of the scientific and practical problem of controlling the accuracy of measuring the parameters of the technological process of making caramel to improve its quality by creating a heuristic analyzer based on the interface of the Fuzzy-Logic system.

The factors affecting the measurement accuracy are analyzed, the possibility of using the Fuzzy-logic apparatus to determine such process parameters that ensure maximum product quality is proved. Computer simulation was carried out, which confirmed that the creation of a heuristic analyzer to determine the quality of caramel is appropriate and necessary in order to prevent the production of low-quality products. Based on the data obtained from the results of field measurements of the parameters of the technological process of making caramel syrup, the standard uncertainty of the measurement results for types A and B was calculated in order to be able to timely predict sensor failures based on the change in the shape of the distribution law of the measurement results and determine the calibration interval for the equipment under study.

**Keywords:** meter, error, fuzzy-logic, heuristic analyzer, accuracy, control.

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку промисловості продукцію високої якості можна випустити тільки при дотриманні всіх технологічних режимів виробництва та оперативному виправленні всіх можливих відхилень. Для такого оперативного виправлення можливих відхилень від оптимального технологічного режиму потрібна постійна оперативна інформація про хід технологічного процесу. Таку інформацію дає служба технохімічного контролю на основі проведених систематичних аналізів і показань контрольно-вимірювальних приладів [1].

Взагалі технологічний контроль (ТК) є основою для всіх стадій виробництва у промисловості: починають його від надходження сировини та закінчують виходом готової продукції. Якість сировини та матеріалів контролюють не тільки в момент надходження, але з періодичністю при тривалому зберіганні на складах. Велике значення ТК має за точністю дозування окремих видів сировини та

напівфабрикатів відповідно до рецептурних норм. Навіть незначні систематичні відхилення в дозуванні можуть значно вплинути на якість продукції, а також на економічні показники роботи підприємства в цілому. Своєчасний ТК параметрів технологічного процесу (ТП) на кожному етапі виробництва дозволить підвищити якість продукції – карамелі, оскільки ретельне дотримання режимів обробки сировини та напівфабрикатів можливе лише при використанні високоточних вимірювальних перетворювачів, що працюють у комплексі з сучасними обчислювальними системами (ОС) [1, 2].

**Аналіз літературних джерел інформації та постановка проблеми.** Предметом нечіткої логіки вважається дослідження суджень в умовах нечіткості, які схожі з судженнями в звичайному сенсі, а також їх застосування в обчислювальних системах [3–6]. В

даний час існує безліч алгоритмів нечіткої логіки. Найчастіше використовуються такі з них: алгоритми Mamdani Tsukamoto Sugeno Larsen. В роботі [7] здійснений вибір моделей для лінгвістичних змінних в нечіткому логічному висновку Mamdani і доведено його перевага перед іншими методами при оцінці якості. Подальший літературний аналіз показує підвищений інтерес до використання математичного апарату нечіткої логіки в промисловості і соціально-економічній сфері. В роботі [8] представлена нова методологія ідентифікації систем для промислових систем. Ефективність запропонованого підходу демонструється на експериментальних трасах від компресора в промислової газотурбінної системі. Так в роботі [9] представлено рішення задачі класифікації дефектів металевих труб нафто- і газопроводів за допомогою алгоритму нечіткого логічного висновку Mamdani і нечіткої бази знань Sugeno. В роботі [10] запропонований метод підвищення точності виявлення дефектів металевих виробів, доведена можливість застосування апарату теорії нечітких множин для визначення таких параметрів перетворювача, які нададуть можливість мінімізувати похибку при визначенні дефекту. В роботі [11] розглянуто рішення задачі контролю точності параметрів технологічного процесу виготовлення кефіру і підвищення його якості за допомогою створення евристичного аналізатора. В роботі [12] розглянуті приклади застосування апарату fuzzy-logic в сфері бізнесу, медичної діагностики, в різних системах управління.

У даній роботі ставиться за мету розглянути практичну реалізацію використання апарату Fuzzy-Logic в питаннях контролю якості карамельного сиропу шляхом моделювання евристичного аналізатора за допомогою інтерфейсу Fuzzy Logic Toolbox в програмному середовищі MATLAB.

**Основний текст.** У роботі [1] запропоновано структурну схему вимірювача основних параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі. На

рис. 1 представлено структурну схему такої системи контролю. Наведена система має вісім каналів вимірювання: шість каналів вимірювання температури, яка діє не первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) ПВП1, ПВП4 – ПВП8; датчик вологості сировини ПВП2; датчик тиску пару ПВП3. Як видно із структурної схеми – датчики розташовані на відповідних ділянках технологічного процесу, а саме: датчики контролю температури ПВП1, вологості сировини ПВП2 та датчик тиску пару ПВП3 необхідні при контролі виготовлення карамельного сиропу; ПВП4 здійснює контроль температури при уварюванні сиропу; ПВП5 – контролює температуру при охолодженні рідкої карамельної маси; ПВП6 – контролює температуру охолодження при витягуванні карамельної маси; ПВП7 – контролює температуру у середині формувальної машини; ПВП8 – контролює температуру охолодження на охолоджувальних пристроях.

До структурної схеми входять такі блоки: мікроконтролер (МК) необхідний для обробки вимірювальної інформації, керування даною інформацією, забезпечення обміну даними між окремими частинами схеми та зовнішніми пристроями, відображає інформацію на рідкокристалічному індикаторі та передає до персонального комп'ютера (ПЕОМ) по інтерфейсу; генератор синхронізуючих імпульсів (ГСІ) виробляє синхроімпульси, необхідні для роботи мікроконтролера; пульт управління (ПУ) виконує початкове налаштування мікроконтролеру, та забезпечує його скидання; інтерфейс (ІФ) призначений для обміну даними із зовнішніми пристроями, зокрема з ПЕОМ; цифровий відліковий пристрій (ЦВП) необхідний для цифрового відображення інформації на екрані; блок живлення (БЖ) забезпечує необхідну напругу для роботи приладу.

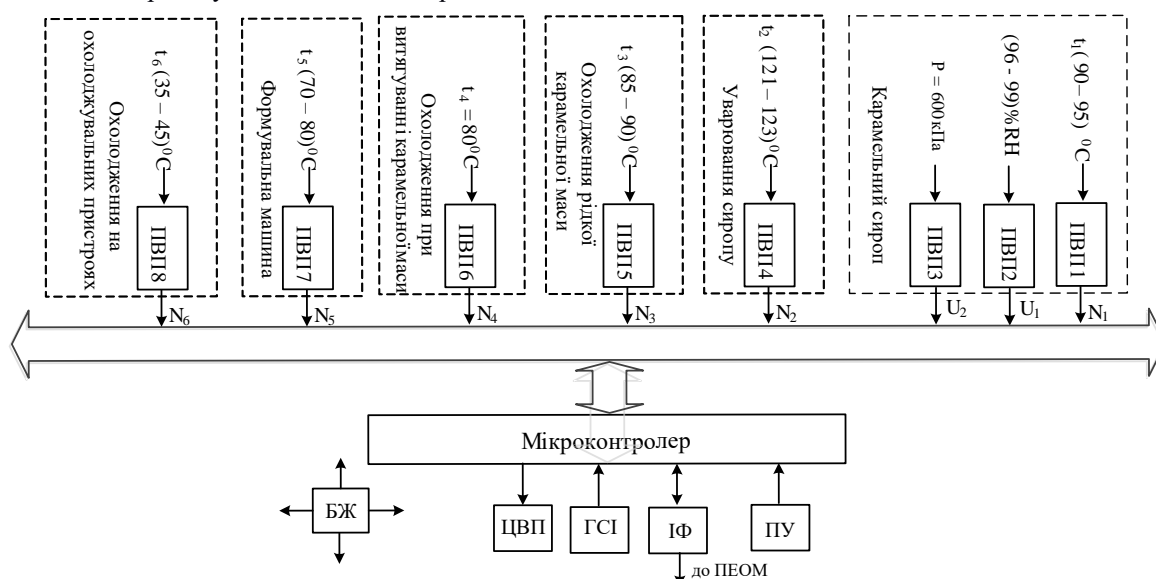


Рис. 1 – Структурна схема вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі

Для приведення приладу у робочий стан необхідно підключити його до джерела енергії. Далі відбувається початкове налаштування мікроконтролеру. Після настройки МК іде вибір вимірювального каналу й очікування готовності даних з ПВП, після чого виконується зчитування мікроконтролером інформації з первинних вимірювальних перетворювачів. Інформація результатів виміру надходить в ОЗП. Далі мікроконтролер обробляє надану інформацію та передає результат виміру в ПЕОМ або відображає на цифровому відліковому пристрої. Якщо потрібно зробити новий вимір, вертаємося до вибору вимірювального каналу. Цикл повторюється знову. Якщо необхідно припинити роботу приладу, то вимикається живлення.

Для побудови евристичного аналізатора буде використано інтерфейс користувача системи fuzzy-

logic, який є додатком програми MatLab. У ньому обираємо алгоритм нечіткого виводу Мамдані (Mamdani), як найбільш придатний для поставленої задачі у порівнянні з алгоритмом Сугено (Michio Sugeno). Для побудови системи з нечіткою логікою (TipExpert) обираємо найбільш критичний для отримання якісної продукції етап технологічного процесу виготовлення карамелі – виготовлення карамельного сиропу. На цьому етапі повинно контролювати три основні параметри, а саме температуру, тиск та вологість. Отже у моделі повинні бути три входи і один вихід – якість карамельного сиропу. У якості першого входу обираємо параметр – температуру (temperature). У якості другого входу – тиск (pressure). Третій вхід – вологість речовини (%RH). У якості вихідної величини обираємо якість карамельного сиропу – (quality) (рис.2).

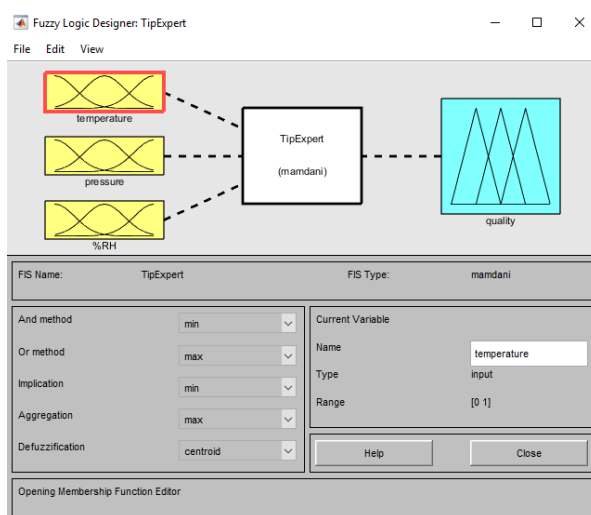


Рис. 2 – Вікно завдання вхідних та вихідних параметрів

Задаємо функції належності для обраної вхідної змінної – температури. У пункті Range встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 90 до 95° C). Задаємо тип функції належності у графі Type: для трьох функцій належності, а саме мінімальної (min), середньої (average) та максимальної (max) обираємо розподіл Гауса.

Задаємо функції належності для обраної вхідної змінної – тиску. У пункті Range встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 597 до 600 kPa). Задаємо тип функції належності у графі Type: для трьох функцій належності, а саме мінімальної (min), середньої (average) та максимальної (max) обираємо розподіл Гауса.

Задаємо функції належності для обраної вхідної змінної – вологість речовини. У пункті Range встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 96 до 99 %RH). Задаємо тип функції належності у графі Type: для трьох функцій належності, а саме мінімальної (min), середньої (average) та максимальної (max) обираємо розподіл Гауса.

Задаємо функції належності для обраної вихідної змінної – якість. У пункті Range встановимо діапазон

у якому змінюється функція (від 0 до 5). Задаємо тип функції належності у графі Type: для трьох функцій належності, а саме погано (bad), задовільно (average) та гарно (good) обираємо розподіл (trimf) – трикутний закон розподілу.

Задаємо правила, за якими буде діяти модель.

Правила складаються за моделлю:

$p_1$  : ЯКЩО  $[x \in A_1]$  ТА  $[y \in B_1]$  ТО  $[z \in C_1]$ ,

$p_2$  : ЯКЩО  $[x \in A_2]$  ТА  $[y \in B_2]$  ТО  $[z \in C_2]$ ,

$p_3$  : ЯКЩО  $[x \in A_3]$  ТА  $[y \in B_3]$  ТО  $[z \in C_3]$

де  $x, y, z \dots$  – іменні вхідних (вихідних) лінгвістичних змінних,  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$  – деякі нечіткі множини, описувані своїми функціями належності.

Якість характеризується такими параметрами як температура, тиск та вологість.

У вікні «правила» складемо правила, які характеризують якість.

Оскільки система має три входи, тому максимум вихідних станів  $3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$  різних вихідних комбінацій.

Для отримання результату можливо скоротити кількість правил до дванадцяти.

Деякі з них:

1. Якщо температура «min», та тиск «min», та вологість «min», то якість «bad».

2. Якщо температура «min», та тиск «min», а вологість сировини «average», то якість також «bad».

3. Якщо температура «min», та тиск «min», та кислотність «max», то якість також «bad» (рис. 3).

Поверхні відгуку при трьох можливих сполученнях параметрів, що впливають на якість, зображені на рис. 4 (а, б, в).

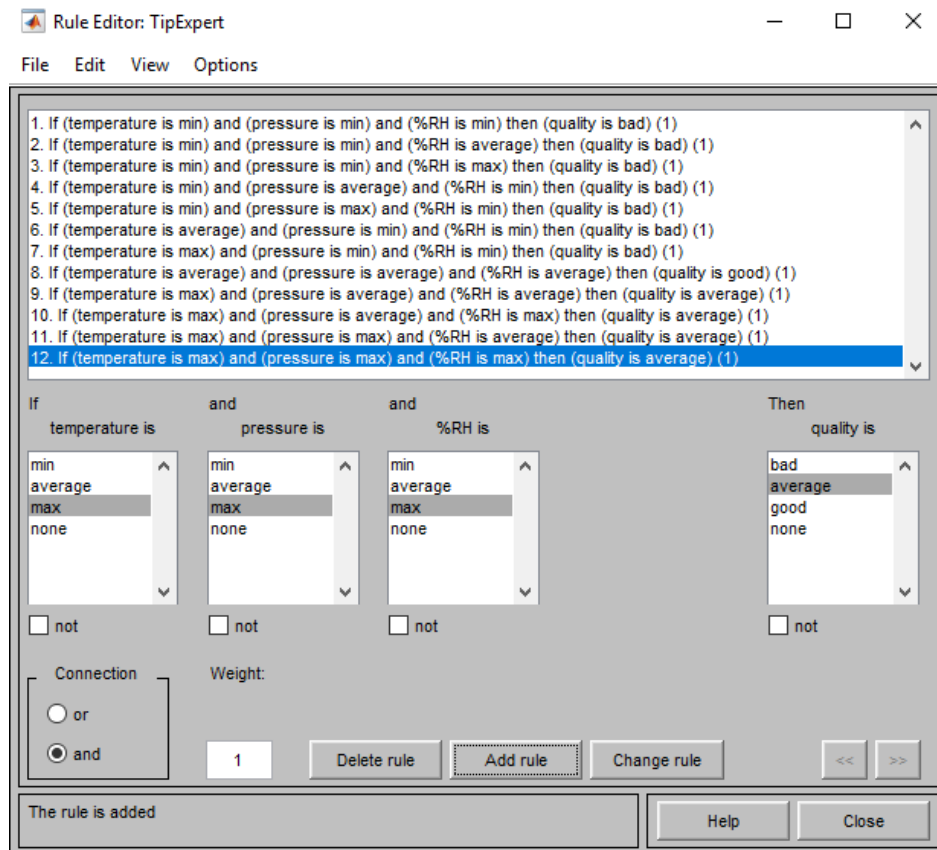
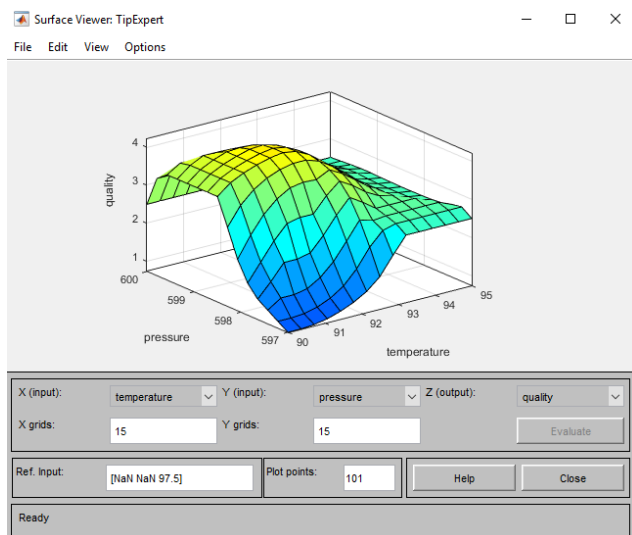


Рис. 3 – Вікно редактора правил

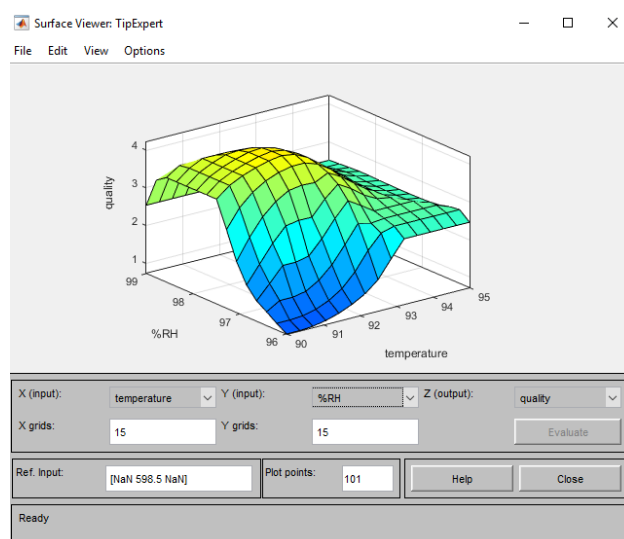
Отже, за допомогою графічного інтерфейсу користувача вдалося побудувати систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити який саме вплив на якість карамельного сиропу оказують температура, тиск, та вологість речовини. З рис 4 видно, що якісно поверхні відгуків при визначенні взаємного впливу температури у об'єднанні з тиском та вологістю співпадають. Такий результат говорить про їх рівнозначний вплив на якість карамельного сиропу. Встановлено, що підтримка параметрів

технологічного процесу у середині робочого діапазону дає можливість отримати найвищу якість готової продукції. Оптимальна якість буде коли температура дорівнює 92,5 °C, % RH – 97,5 %, тиск – 599 кПа.

Було проведено обробку результатів прямих багатовимірних вимірювань з датчиків контролю температури, тиску пару, вологості речовин та підтверджено гіпотезу про нормальність закону розподілу результатів вимірювань.

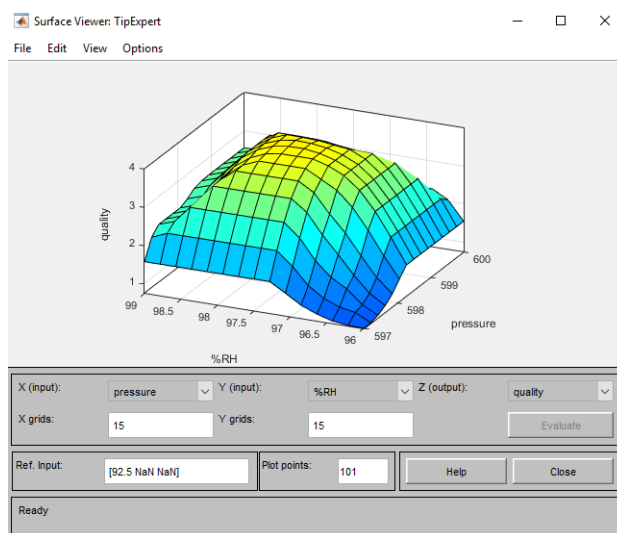


а



б

в



в

Рис. 4 – Поверхні відгуку: а – значень змінних температури та тиску, б – змінних температури та вологості речовини, в – значень змінних тиску та вологості речовини

На рис. 5 представлено результати спостережень за зміною температури (рис. 5а), за зміною тиску пару (рис. 5в), та за зміною вологості речовин (рис. 5в).

Стандартна невизначеність вимірювань типу А вхідної величини  $X_i$  розраховується за формулою

$$u_A(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}, \quad (1)$$

де  $n_i$  – кількість спостережень проведених при вимірюванні  $X_i$ .

Стандартна невизначеність вимірювань типу А вхідних величин – температури, тиску пару, вологості сировини розраховується за формулою (1)

$$u_A(\bar{t}_i) = 0,114 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$u_A(\bar{p}_i) = 0,366 \text{ кПа}.$$

$$u_A(\bar{RH}_i) = 0,159 \text{ } \%.$$

Для результатів вимірювання, що описуються нормальним розподілом, стандартна невизначеність типу В оцінюється за формулою

$$u_B(x) = \frac{b-a}{6} \quad (2)$$

Температура сировини вимірюється у діапазоні від  $90^\circ\text{C}$  до  $95^\circ\text{C}$ , отже стандартна невизначеність (тип В) згідно формулі (2) дорівнює

$$u_B(t) = \frac{95-90}{6} = 0,833 \text{ } ^\circ\text{C}.$$



Тиск пари змінюється у діапазоні від 597 кПа до 600 кПа, отже стандартна невизначеність (тип В) згідно формулі (2) дорівнює

$$u_B(P) = \frac{600 - 597}{6} = 0,5 \text{ кПа.}$$

Вологість сировини змінюється у діапазоні від 96 % до 99 %, отже стандартна невизначеність (тип В) згідно формулі (2) дорівнює

$$u_B(RH) = \frac{99 - 96}{6} = 0,5 \text{ \%}.$$

На підставі даних, отриманих з результатів натурних вимірювань параметрів технологічного процесу виготовлення карамельного сиропу вдалося провести розрахунки стандартних невизначеності по типам А та В.

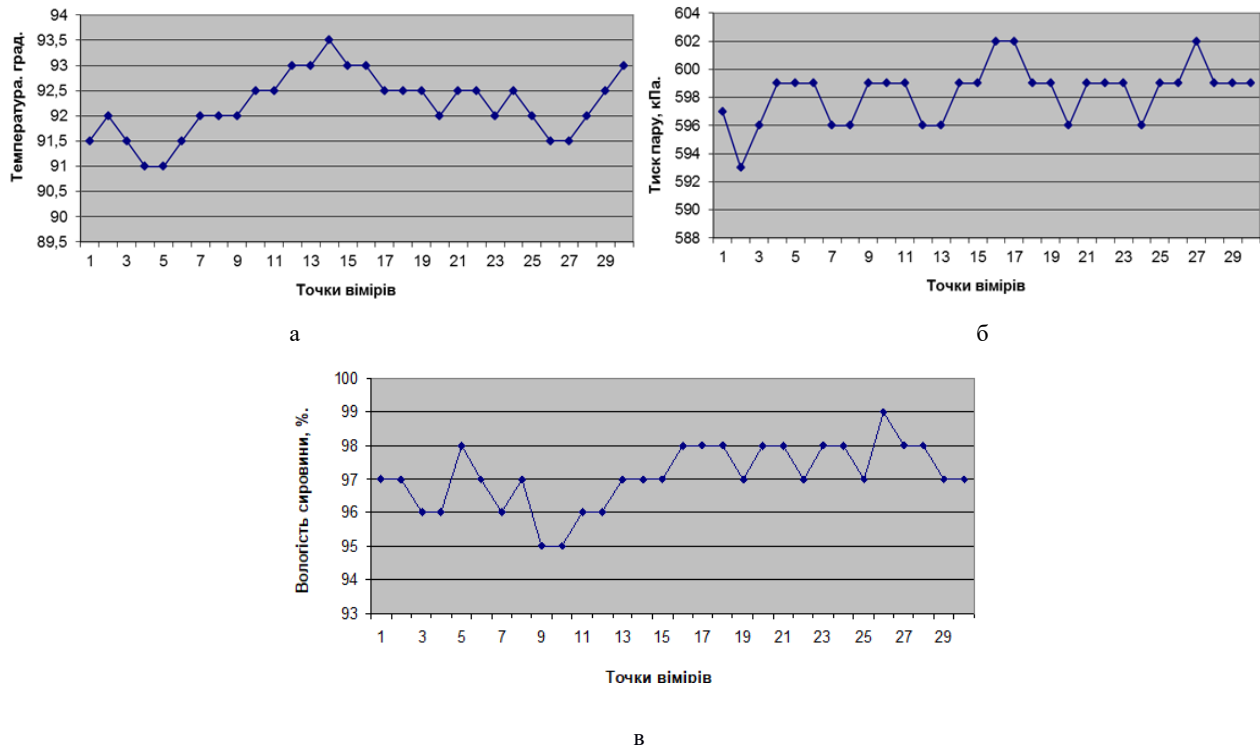


Рис. 5 – Спостереження за зміною: а – температури, б – тиску, в – вологістю речовин

**Висновок.** Запропонований у даній роботі підхід, заснований на нечіткій логіці, дозволяє врахувати параметри, що впливають на технологічний процес для визначення оптимальних співвідношень між ними. Стає можливим вирішити задачу контролю якості продукції саме завдяки апарату fuzzy-logic. Використання графічного інтерфейсу користувача побудованої системи з нечіткою логікою дозволяє встановити якими мають бути вхідні параметри для того, щоб забезпечити високу якість на виході.

Запропонований евристичний аналізатор виконує роль порадики для інженера-технолога і може бути використаний у будь-якій сфері народного господарства.

На підставі даних, отриманих з результатів натурних вимірювань параметрів технологічного процесу виготовлення карамельного сиропу та даних, що отримані за допомогою системи з нечіткою логікою вдалося провести розрахунки стандартних невизначеності по типам А та В. Отримані значення невизначеності цілком задовольняють умовам технічного завдання.

#### Список літератури

1. Григоренко І. В. Вимірювач основних параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі / І. В. Григоренко, Л. О. Вовк // II Міжнародна науково-технічна конференція: Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування України. – Харків, 2018. – С. 165–166.
2. Григоренко І. В. Розробка цифрового вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі / І. В. Григоренко, Л. О. Вовк // XXVI Міжнар. наук. – практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я, том 2. – Харків, 2018. – С. 14.
3. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control, 1965, vol. 8 (3), PP. 338–353. doi: 10.2307/2272014.
4. Zadeh L. A. Fuzzy logic = computing with words. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996, vol. 4, Issue 2, PP.103–111, doi: 10.1109/91.493904.
5. Zadeh L. A. Similarity relations and fuzzy orderings. Information sciences, 1971, vol. 3, PP. 177–200. doi: 10.1016/S0020-0255(71)80005-1.
6. Hrihorenko I. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services / I. Hrihorenko, T. Drozdova, S. Hrihorenko, E. Tverytnykova // Advanced information system, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Vol. 3, No 4 – P. 118–125.
7. Wu H., Mendel J. M. On Choosing Models for Linguistic Connector Words for Mamdani Fuzzy Logic Systems. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 2004, vol. 12, PP. 29–44. doi: 10.1109/TFUZZ.2003.822675.

8. Yu Zhang, Jun Chen, Chris Bingham, Mahdi Mahfouf, A new adaptive Mamdani-type fuzzy modeling strategy for industrial gas turbines. IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 6–11 July 2014, Milan, Italy. doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891815.
9. Григоренко І. В. Дослідження можливостей використання апарату fuzzy-logic при класифікації дефектів металевих труб / І. В. Григоренко, С. М. Григоренко, С. Ю. Гавриленко // Національний науковий центр «Інститут метрології» Український метрологічний журнал – № 2, Харків – 2017. – С. 42–49. doi: 10.24027/2306-7039.2.2017.109757.
10. Григоренко І. В. Дослідження впливу зовнішніх та внутрішніх факторів на похибку виявлення дефектів металевих виробів завдяки апарату fuzzy-logic / І. В. Григоренко, С. М. Григоренко // Національний університет радіоелектроніки. Метрологія та прилади № 3 (65), Харків – 2017. – С. 44–48.
11. Григоренко І. В. Використання нечіткої логіки для контролю точності та підвищення якості продукції / І. В. Григоренко, С. М. Григоренко, Є. А. Безбородий // Національний університет радіоелектроніки. Метрологія та прилади № 3 (71), Харків – 2018. – С. 52–57.
12. Asai K., Vatada D., Ivai S. Prikladnye nechetkie sistemy: M.: Mir, 1993. 368 p.
4. Zadeh L.A. Fuzzy logic = computing with words. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996, vol. 4, Issue 2, pp.103–111, doi: 10.1109/91.493904.
5. Zadeh L.A. Similarity relations and fuzzy orderings. Information sciences, 1971, vol. 3, pp. 177–200. doi: 10.1016/S0020-0255(71)80005-1.
6. Hrihorenko I. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services / I. Hrihorenko, T. Drozdova, S. Hrihorenko, E. Tverytnykova // Advanced information system, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Vol. 3, No 4 – P. 118–125.
7. Wu H., Mendel J.M. On Choosing Models for Linguistic Connector Words for Mamdani Fuzzy Logic Systems. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 2004, Vol. 12, PP. 29–44. doi: 10.1109/TFUZZ.2003.822675.
8. Yu Zhang, Jun Chen, Chris Bingham, Mahdi Mahfouf, A new adaptive Mamdani-type fuzzy modeling strategy for industrial gas turbines. IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 6–11 July 2014, Milan, Italy. doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891815.
9. Hrihorenko I.V., Hrihorenko S.M., Havrilenko S.Y. Investigation of the possibilities of using the fuzzy-logic apparatus in measuring and classifying defects in metal tubes. Ukrainian etrological Journal, 2017, Vol. 2. PP. 42–49. doi: 10.24027/2306-7039.2.2017.109757.
10. Hrihorenko I.V., Hrihorenko S.M. Doslidzhennya vplyvu zovnishnih ta vnutrishnih faktoriv na pobibku viyavleniya defektiv metalievih virobiv zavdyaki aparatu fuzzy-logic. – Natsionalniy universitet radioelektroniki. – Metrologiya ta priladi, 2017, Vol. 3 (65), PP. 44–48. (in Ukrainian).
11. Hrihorenko I.V., Hrihorenko S.M., Bezborodiy Y.A. Vykorystannya nechitkoyi logiky dlya kontrolyu tochnosti ta pidvyshchennya yakosti produkciyi // Natsionalniy universitet radioelektroniki. – Metrologiya ta priladi, 2018, Vol. 3 (71), PP. 52–57. (in Ukrainian).
12. Asai K., Vatada D., Ivai S. Prikladnye nechetkie sistemy: Moscow: Mir, 1993. – 368 p.

#### References (transliterated)

Надійшла (received) 30.11.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Григоренко Ігор Володимирович (Григоренко Игорь Владимирович, Hrihorenko Igor Vladimirovich)** – кандидат технічних наук, доцент; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем; м. Харків, Україна; e-mail: grigmaestro@gmail.com.

**Григоренко Світлана Миколаївна (Григоренко Светлана Николаевна, Hrihorenko Svitlana Mukolayivna)** – кандидат технічних наук, доцент; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики; м. Харків, Україна; e-mail: sngloba@gmail.com.

**Вовк Людмила Олександрівна (Вовк Людмила Александровна, Vovk Lyudmila Oleksandrivna)** – магістрант; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».